

基于双向正交泵浦半导体光放大器结构的全光相位保持幅度再生技术*

孙凡¹⁾ 文峰^{1)†} 武保剑¹⁾ Tan Ming-Ming²⁾ 凌云¹⁾ 邱昆¹⁾

1) (电子科技大学信息与通信工程学院, 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

2) (Aston Institute of Photonics Technologies, Aston University, Birmingham B4 7ET, UK)

(2022 年 4 月 15 日收到; 2022 年 6 月 29 日收到修改稿)

提出了一种基于双向正交泵浦半导体光放大器 (SOA) 的相位保持幅度再生方案, 实验分析了泵浦、信号及其端面反射场之间的多重四波混频 (FWM) 转换过程, 探索了同向场作用下的共轭光再生能力. 测量了注入不同信号光功率、信号质量情况下获得的幅度噪声压缩效果以及相位输出特性, 印证双向正交泵浦 SOA 再生器的相位保持幅度再生功能, 通过实验测量得到 2.2 dB 的幅度噪声压缩结果. 进一步通过仿真分析系统, 探讨了多进制数字相位调制 (MPSK) 信号的工作特性, 表明该再生器可在相同工作参数下支持高阶信号的再生需求.

关键词: 光相位共轭, 半导体光放大器, 四波混频, 全光再生

PACS: 42.65.-k, 42.65.Hw, 42.65.Ky

DOI: 10.7498/aps.71.20220703

1 引言

全光再生技术是一种可以直接在光域提升信号质量的数据处理方法. 该技术避免了现有光纤通信系统中广泛使用电信号补偿方案所引入的高能耗光-电-光 (O/E/O) 转换过程^[1,2], 以及电域信号处理固有的电子瓶颈问题^[3], 实现了全光域信号质量提升, 为光纤通信系统的全光传输与处理一体化技术演进提供核心功能器件^[4].

全光再生技术已经过数十年发展, 早期研究主要集中在面向开关键控 (OOK) 信号的幅度再生, 并实现高速 100 Gb/s 信号的数据处理能力^[5], 以及波分复用系统中的多通道再生^[6]. 伴随着相干调制技术在光纤通信系统中的广泛应用, 全光再生方案也必须具备面向相干调制格式的全光处理能力.

通过相敏放大技术可以实现信号相位噪声的全光压缩, 并实验展示了正交相移键控 (QPSK) 信号的相位再生^[7]. 但该技术仅可压缩相位噪声, 无法改善相干调制信号的幅度扰动问题, 这成为制约该技术在相干光通信系统中全面应用的关键问题之一.

为解决相干调制信号的幅度噪声抑制问题, 即实现具有相位保持特性的幅度再生, 研究人员提出了光纤型的非线性光环镜 (NOLM) 方案^[8-10]以及半导体光放大器 (SOA) 实现的参量过程方案^[11,12]. 光纤型再生方案需要注入高功率泵浦以激发非线性过程, 因此系统实践过程中需要额外的受激布里渊 (SBS) 阈值提升单元以改善泵浦注入效果, 导致该方案实现复杂、能耗高. 而利用有源 SOA 实现的相位保持幅度再生, 仅需要毫瓦量级的泵浦光即可激发参量效应, 因此更加适用于实际系统应用. 目前传统的 SOA 方案采用单泵浦参量过程, 再生所

* 国家自然科学基金 (批准号: 61975027, 61671108) 和四川省科技计划 (批准号: 2021YFG0143) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fengwen@uestc.edu.cn

需的泵浦-信号功率比 (PSR) 在 10 dB 以上, 严重限制了信号功率注入范围, 降低了再生信号的转换效率. 近些年, 利用双向 SOA 的非线性过程已可实现双端口的相位共轭转换 (OPC)^[13]. 通过本文作者的前期探索发现, 该结构可有效降低 SOA 参量过程中的 PSR 要求, 仅在约 2 dB 情况下就可实现高质量的 OPC 过程^[14]. 本论文在此工作基础上, 进一步拓展非线性双向 SOA 结构的全光信号处理能力, 实现具有相位保持特性的全光幅度再生.

本论文提出了一种基于双向正交泵浦注入下的非线性 SOA 再生方案, 该技术利用泵浦与信号形成的 Bragg 光栅, 实现对泵浦、信号及其端面反射光的衍射效果, 得到多重四波混频过程 (FWM). 针对转换效率占据优势的同向场作用情况, 开展相位保持幅度再生实验测试, 达到 2.2 dB 以上的幅度噪声压缩效果, 支撑全光再生技术对于相干调制格式信号的处理功能.

2 工作原理

双向正交泵浦 SOA 全光再生结构考虑在单一非线性 SOA 单元中, 利用其可支持双向光注入的特性, 实现多重 FWM 过程, 其光场注入结构如图 1(a) 所示. 在该再生结构中, 外部注入的光场有 3 个: 从输入端口注入的泵浦光 P_H^f 与信号光 S_H^f , 以及从输出端口反向注入的泵浦光 P_V^b . 3 束光场详见图 1(a) 中实线箭头所示. 下标 H 和 V 分别代表平行 (//) 和垂直 (\perp) 偏振态; 上标 f 和 b 对应正向传播 ($z > 0$) 和反向传播 ($z < 0$) 情况. 输入端口的泵浦与信号光同偏振, 并与输出端口注入的泵浦呈偏振正交态, 因此双方的 H 偏振态与 V 偏振态可互换. 在该单元中, 除上述 3 个注入光场以外, 由于 SOA 存在端面反射^[13], 导致其反射残留在对向端面处重新进入 SOA 结构, 在放大与非线

性效应的共同作用下产生新的 FWM 过程. 3 个反射光场分别是输入端口注入的泵浦光 P_H^f 和信号光 S_H^f 在输出端面形成的反射残留场 P_H^b 与 S_H^b , 以及输出端口注入的泵浦光 P_V^b 在输入端面形成的反射残留场 P_V^f , 上述 3 束光已在图 1(a) 中用虚线箭头标注. 因此在双向正交泵浦 SOA 全光再生结构中, 共有 6 束光场相互作用, 形成多重 FWM 过程.

根据 Bragg 散射 FWM 理论模型可知^[15–19], 泵浦与信号之间的光频差在 SOA 结构中形成折射率调制光栅, 与输入的泵浦和信号光分别作用得到 FWM 的共轭或闲频光. 针对本论文结构, 该 Bragg 光栅仅出现在同偏振的泵浦与信号之中, 即 P_H^f 与 S_H^f 形成的光栅以及 P_H^b 与 S_H^b 形成的光栅^[20,21]. 上述两个光栅的周期均为 $\Omega = |\omega_p - \omega_s|$, 但光栅传播方向相反, 其中 ω_i ($i = p, s$) 对应泵浦和信号的角频率. 虽然双向注入的泵浦光偏振态正交, 但频率值一致. 上述两个光栅可与正向和反向传输的泵浦、信号及其反射残留场发生衍射作用, 形成丰富的 FWM 的产物. 但受到相位匹配条件的限制, 仅当失配因子 $\Delta k_c = k_c - (2k_p - k_s) \simeq 0$ 时, 才可获得有效的共轭转换, 该共轭产物即为本论文探讨的再生信号. k_j ($j = p, s, c$) 分别对应泵浦、信号以及共轭光的波数. 表 1 列出了不同偏振情况下的共轭信号产物情况, 该表仅统计了失配因子 $\Delta k_c = 0$ 情况下的组合结果, 其余产物受限于转换效率较低, 无法在实验中观测到. 该表涵盖了作用光场、波矢、偏振态以及端口信息, 根据正交泵浦分配情况, 每组实验结构共有 4 个共轭光产物, 从输入端口和输出端口同时获得. 受到光场强度的限制, 反射残留场作用下的 FWM 过程较弱, 因此尽管在同一个端口可输出两个共轭产物, 但其总偏振态主要由注入的泵浦光场的偏振态决定. 上述多重 FWM 过程就是双向正交泵浦 SOA 再生结构中, 可同时在双端口得到共轭转换的工作基础.

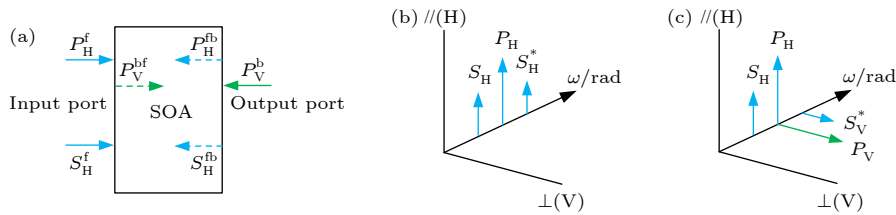


图 1 (a) 双向 SOA 的正向和反向传输光场示意图; (b) 同偏振四波混频过程; (c) 正交泵浦四波混频过程

Fig. 1. (a) Schematic diagram of forward and backward transmission in SOA; (b) co-polarization FWM; (c) orthogonal-pump FWM.

表 1 不同偏振正交泵浦结构对应的四波混频相位失配分析

Table 1. Analysis of phase mismatch of four-wave mixing corresponding to different polarization orthogonal pump structures.

两组实验结构	实验设置	形成折射率光栅的光场	工作泵浦光场	光栅波矢 $k_{\Omega}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$	共轭光波矢 $k_c/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$	相位失配 $\Delta k/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$	共轭光偏振态	端口信息
一组	HF	P_H^f, S_H^f	P_H^f	$k_p - k_s (z > 0)$	$2k_p - k_s$	0	H	输出端
		P_H^f, S_H^f	P_V^{bf}	$k_p - k_s (z > 0)$	$2k_p - k_s$	0	V	输出端
	VB	P_H^{fb}, S_H^{fb}	P_V^{fb}	$k_p - k_s (z < 0)$	$2k_p - k_s$	0	V	输入端
		P_H^{fb}, S_H^{fb}	P_H^{fb}	$k_p - k_s (z < 0)$	$2k_p - k_s$	0	H	输入端
二组	VF	P_V^f, S_V^f	P_V^f	$k_p - k_s (z > 0)$	$2k_p - k_s$	0	V	输出端
		P_V^f, S_V^f	P_H^{bf}	$k_p - k_s (z > 0)$	$2k_p - k_s$	0	H	输出端
	HB	P_V^{fb}, S_V^{fb}	P_H^{fb}	$k_p - k_s (z < 0)$	$2k_p - k_s$	0	H	输入端
		P_V^{fb}, S_V^{fb}	P_V^{fb}	$k_p - k_s (z < 0)$	$2k_p - k_s$	0	V	输入端

3 实验研究

根据工作原理分析可知, 在双向正交泵浦 SOA 结构中不仅可以在同向传输的泵浦和信号之间发生 FWM 过程, 还可以在反向泵浦与信号之间得到 FWM 产物, 即实现双向 FWM 效应, 这突破了传统 FWM 理论关于相位匹配条件的限制. 为验证双向正交泵浦 SOA 结构的多重 FWM 现象, 开展实验研究工作, 并探索其相位保持幅度再生效果.

3.1 实验结构

双向正交泵浦 SOA 实验系统如图 2 所示. 实验系统的核心是非线性双向 SOA 器件, 该器件为 CIP 公司提供的非线性 SOA 单元 (SOA-NL-OEC-1550), 具有双向光注入、偏振无关放大 (偏振相关增益为 0.5 dB) 特性, 满足实验要求. 在双向正交泵浦实验测试过程中, 该 SOA 的驱动电流设置为 464 mA. 实验中有两类光场注入到 SOA 单元中: 连续泵浦光以及 QPSK 信号光. 泵浦光由本地激

光器产生, 其波长为 1548.62 nm, 输出光功率达到 0 dBm. 泵浦光通过偏振分束器 (PBS) 分为功率一致、偏振正交的两束光, 分别从输入和输出端口耦合进入 SOA 单元. QPSK 信号由相干光发射机产生, 其载波波长为 1549.33 nm, 信号速率为 10 Gb/s. 信号光偏振态由偏振控制器 (PC1) 调控, 使其与正向输入的泵浦光偏振态一致, 偏振特性由偏振分析仪 (PA) 实时监控. 虽然 QPSK 信号光仅从 SOA 的输入端口注入, 但 FWM 产物可同时在输入和输出两个端口获得. 为此, 测试中在 SOA 的双侧端口处均添加光环形器 (CIR1 和 CIR2), 以此分离输入信号与 FWM 产物. 非线性双向 SOA 的光谱结果由光谱仪测试, 而 QPSK 光信号通过相干接收机转换后, 在实时示波器中采样分析.

3.2 反射测试

根据工作原理可知, 在双向 SOA 器件中发生的多重四波混频过程与器件的端面反射密切相关. 为此根据放大自发辐射光谱测 SOA 端面反射率的

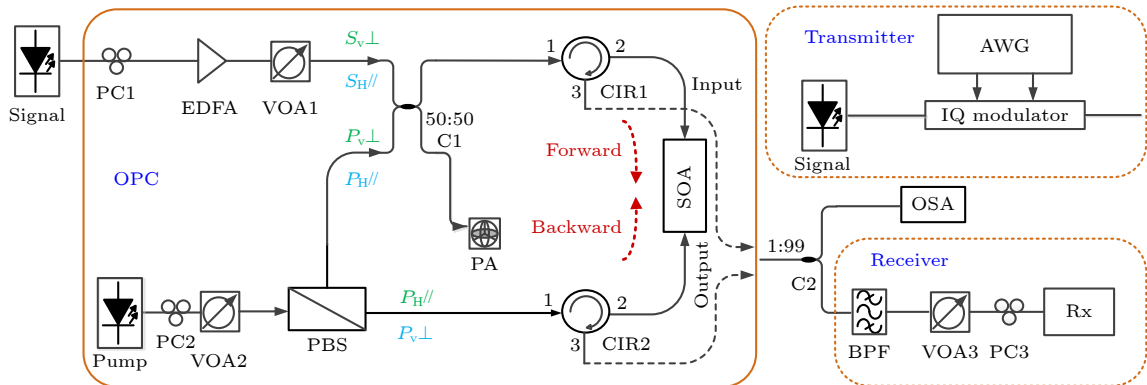


图 2 双向正交泵浦 SOA 实验测试系统图

Fig. 2. Experiment setup of bidirectional orthogonal-pumped SOA subsystem.

方法开展了针对实验用非线性 SOA 单元的反射率测试. 端面反射率计算公式如下所示 [22]:

$$R = \frac{1}{G_s} \left[(P^+)^{1/2} - (P^-)^{1/2} \right] / \left[(P^+)^{1/2} + (P^-)^{1/2} \right], \quad (1)$$

其中 R 表示反射率, G_s 是光波单次通过 SOA 净增益, P^+ 和 P^- 是相邻波峰及波谷处的峰值功率. 在没有外界注入光的情况下, 仅通过直流电流驱动非线性 SOA, 此时监控输入和输出端口获得的不同驱动电流下的自发辐射光谱结果如图 3(a), (b) 所示. 光谱仪测量的分辨率为 0.03 nm. 两图对比可以看出, 在驱动电流逐渐增强的过程中, 输入和输出端口得到的光谱整体变强的演化趋势是一致的, 但输出端口光谱结果更加振荡, 特别在高驱动电流情况下更为明显. 两端光谱特性的差异可能来自于该器件在输入和输出端面上的镀膜差异所导致的. 由于该款器件是针对非线性应用而特殊设计的 SOA, 其工作特性注重更高的注入光功率, 承受更大的驱动电流, 因此光谱特性、反射率效果与放大器应用的 SOA 器件有差异.

根据驱动电流为 100 mA 情况下获得的自发辐射谱以及 (1) 式可计算得到反射率结果如图 3(c) 所示. 在工作波长范围 1548.5 nm±1 nm 内, 其反射率结果为 $(3.49 \pm 3.11) \times 10^{-3}$. 当驱动电流增强后, 部分波长获得更高的光增益 (如 1562 nm 波长处), 使其功率值较其他波长高出仅 20 dB, 这导致反射率结果出现振荡, 上述振荡结果与文献 [13] 中非线性 SOA 的测量特性一致. 但根据图 3(d) 给出的不同驱动电流下工作波长范围 1548.5 nm±1 nm 内反射率结果可以看出, 虽然该振荡特性引入一定干扰, 但该 SOA 的端面反射率均在 10^{-3} 量级.

3.3 光谱响应

根据偏振态以及注入端口的分配情况, 双向正交泵浦 SOA 结构存在 2 组共 4 种光作用过程: 第一组为 H 偏振正向泵浦 (HF)+V 偏振逆向泵浦 (VB)、第二组是 V 偏振正向泵浦 (VF)+H 偏振逆向泵浦 (HB). 由于双向注入的泵浦光是由 PBS 器件分光得到, 因此其偏振态存在正交性; 而信号光

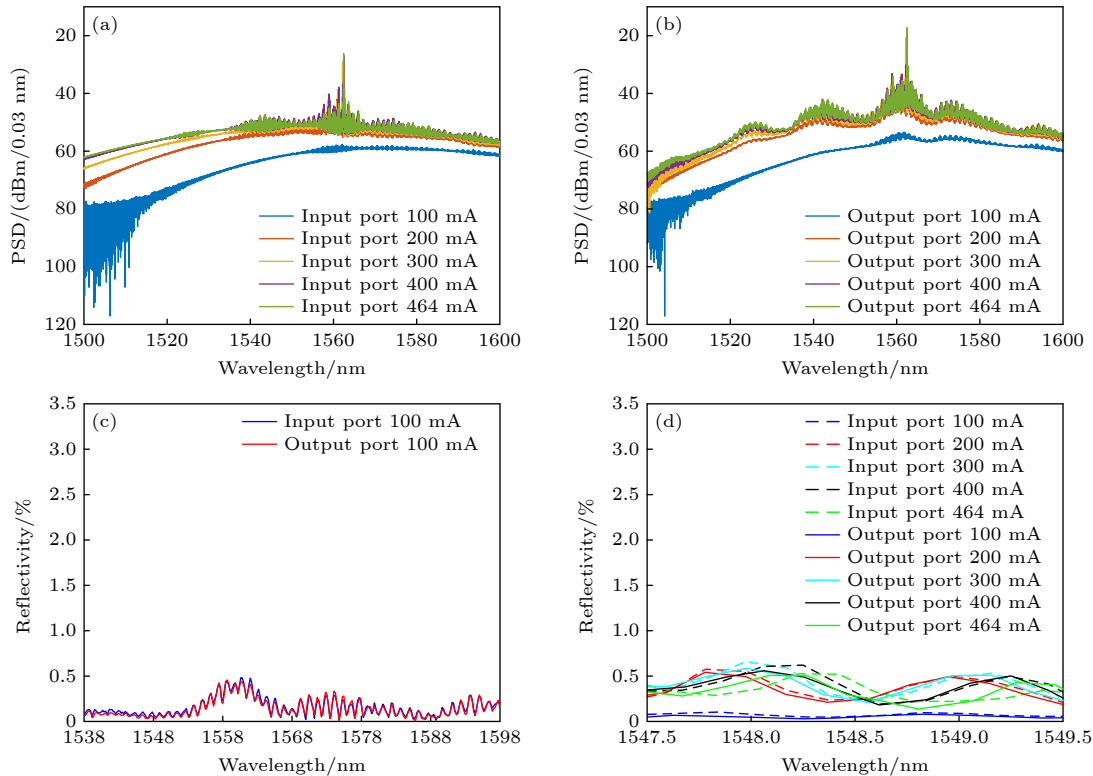


图 3 不同驱动电流下 (a) 输入和 (b) 输出端口处的放大自发辐射光谱; (c) 驱动电流为 100 mA 时, 计算获得的反射率分布效果; (d) 不同驱动电流下获得的工作波长范围 1547.5—1549.5 nm 内 SOA 反射率结果

Fig. 3. Power spectral density (PSD) of amplified spontaneous emission (ASE) spectrum under different driving currents at (a) input port and (b) output port; (c) the reflectivity at driving current 100 mA; (d) reflectivity between 1547.5 nm and 1549.5 nm obtained under different driving currents.

偏振态与正向注入的泵浦光一致, 所以整个系统的工作情况可由泵浦光的偏振态分类获得. 根据工作原理分析可知, 每一组注入光情况均可同时在输入和输出端口获得 FWM 产物, 为此通过光谱仪测量 CIR 第 3 端口输出结果, 可验证双向 SOA 结构中得到多重 FWM 效果.

图 4(a), (d), (g) 和 (j) 是实验获得的 HF, VB, VF 和 HB 情况下的 FWM 结果. 由其清晰的 FWM 产物可知, 在非线性双向 SOA 单元中的确发生了 Bragg 散射 FWM 过程, 该过程不仅在同向泵浦与信号之间发生非线性混频作用, 还在逆向泵浦与信号之间产生 FWM 产物. 根据光谱测量结果可知:

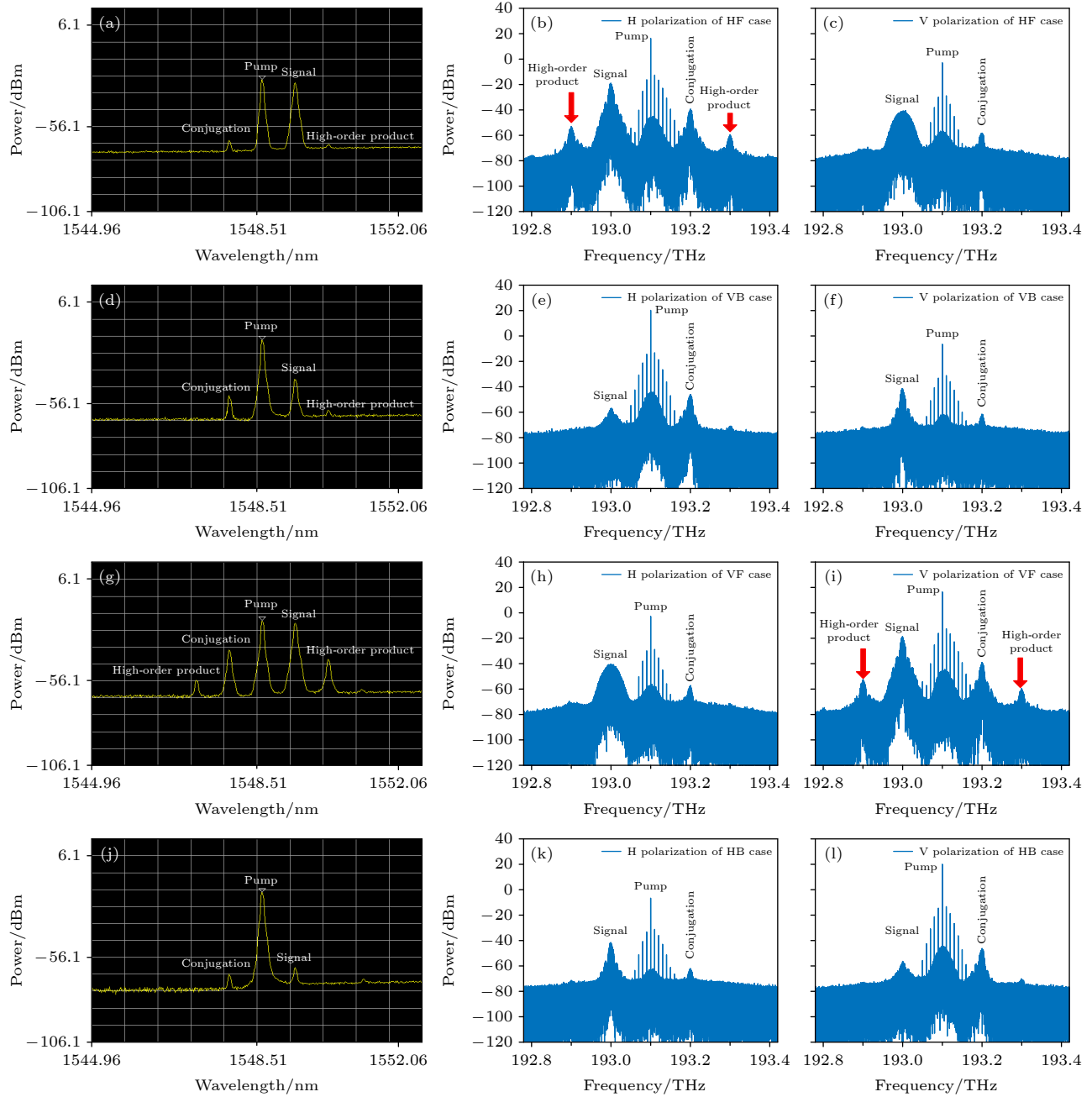


图 4 四种 FWM 情况下的光谱 HF 注入下的 (a) 实验光谱图及 (b) H 偏振与 (c) V 偏振的仿真光谱图; VB 注入下的 (d) 实验光谱图及 (e) H 偏振与 (f) V 偏振的仿真光谱图; VF 注入下的 (g) 实验光谱图及 (h) H 偏振与 (i) V 偏振的仿真光谱图; HB 注入下的 (j) 实验光谱图及 (k) H 偏振与 (l) V 偏振的仿真光谱图

Fig. 4. Optical spectral results from the four FWM cases: (a) Experimental data and simulation results of (b) H and (c) V polarization for HF case; (d) experimental data and simulation results of (e) H and (f) V polarization for VB case; (g) experimental data and simulation results of (h) H and (i) V polarization for VF case; (j) experimental data and simulation results of (k) H and (l) V polarization for HB case.

1) 从 FWM 过程产生高阶产物的角度来看, 同向传输的泵浦与信号之间的作用过程更为激烈, 例如图 4(a), (g) 所示; 2) 虽然信号光仅从正向端口注入 SOA 单元之中, 但由于存在端面反射问题, 逆向泵浦可与信号光的反射残留发生 FWM 过程, 该反射残留可在 VB 和 HB 光谱中清晰观测到; 3) 从共轭光强度的角度来看, 同向传输的泵浦与信号作用过程最为明显, 有助于获得较高的共轭光产物, 便于后续再生性能测试; 4) 实验获得的共轭光、闲频光等四波混频产物与泵浦频率的间隔均为 88.75 GHz, 这与 Bragg 散射 FWM 理论模型中光栅周期参数 (泵浦和信号频率间隔 88.75 GHz) 一致, 验证了泵浦与信号光频差在 SOA 结构中形成折射率调制光栅的理论假说.

为进一步验证正交泵浦 SOA 的多重 FWM 效果, 在 VPITransmissionMaker 平台上搭建了与实验环境一致的仿真系统, 仿真中使用的 SOA 模型是该平台中的“SOA_TLM”, 主要参数为: 器件截面长度为 $6.33 \times 10^{-4} \text{m}$, 非线性指数是 $6.2 \times 10^{-19} \text{m}^2/\text{W}$, 有效模面积 10^{-12}m^2 . 通过注入泵浦功率 0 dBm 和信号功率 -1 dBm, 获得如图 4(b), (c), (e), (f), (h), (i), (k), (l) 的仿真光谱结果, 分别对应 HF, VB, VF 和 HB 泵浦情况下的 H 偏振和 V 偏振光谱测试情况.

根据表 1 所列 FWM 产物所示, 其输出共轭光均存在 H 和 V 偏振分量结果, 因此在仿真分析过程中, 利用偏振分束器分离每一种泵浦情况下的 FWM 光谱结果, 对比正交偏振分量下获得的非线性产物特性. 对于 HF 泵浦情况, 其正向泵浦偏振态为 H 偏振态, 此时信号光与正向泵浦偏振态一致, 也为 H 偏振态. 在 SOA 的输出端口, 获得同向四波混频产物结果, 如图 4(b), (c) 所示. 对于 H 偏振输出结果, 四波混频过程激烈, 共轭信号转换效率高, 通过滤波后测得共轭光功率为 -3.77 dBm. 而在偏振分束器 V 偏振端口得到的共轭光功率仅为 -21.66 dBm, 两者相差约 18 dB. 仿真过程还对比了其余 3 种泵浦情况 (VB, VF 和 HB) 获得正交共轭光功率差值分别为 15, 18, 15 dB. 可以看出, 虽然正交泵浦 SOA 结构中可以获得正交四波混频产物, 但两者功率相差较大, 仍以主偏振态下得到的优势输出占据主导. 因此实验测量的光谱结果图 4(a), (d), (g), (j) 与仿真得到的结果图 4(b), (e), (i), (l) 表现出相似的光谱规律.

无法在实验过程中正确分离出上述正交偏振分量结果, 主要受到以下两个问题的影响: 1) SOA 输出尾纤为非保偏光纤, 导致正交偏振分量之间发生了偏振耦合, 此时再通过偏振分束器分离得到的产物与理论模型构建的正交偏振输出不一致; 2) 正交产物之间的功率差异较大, 均在 15 dB 以上, 无法通过监控信号质量的方式确认偏振分束器输入端的正确偏振态. 因此只能通过仿真分析手段对比表 1 所示的正交产物结果.

此外, 由于实验中光谱仪分辨率为 0.03 nm, 而仿真计算得到的光谱结果相邻频率点之间仅相差 $3.05 \times 10^{-4} \text{GHz}$. 仿真获得的光谱结果具有更高的精确度, 在测量连续光时, 可以准确测得极窄线宽下的光谱结果. 因此仿真得到的光谱结果与实验测量结果在光谱细节上存在一定的差异性, 但实际的光谱内容基本一致. 以光谱图 4(g), (i) 为例, 实验获得的 FWM 光谱中泵浦和信号功率差值约为 5 dB, 而通过滤波器滤得的仿真结果中泵浦功率和信号功率分别为 16.54 dBm 和 15.87 dBm, 差值也在 1 dB, 两者基本一致. 对于高阶旁瓣的问题, 的确在部分仿真结果中获得的高阶旁瓣功率较高, 除了前面提到的分辨率差异以外, 仿真过程中 SOA 内部参数设置也带来一定的差异性. 但上述差异性没有改变正交泵浦 SOA 结构中的 Bragg 散射 FWM 基本规律. 通过仿真与实验的综合分析, 印证了非线性双向 SOA 单元中的多重 FWM 作用过程, 为测试共轭产物的再生性能提供支撑.

3.4 再生结果

在图 2 所示的正交泵浦 SOA 结构中进一步开展相位保持幅度再生实验研究. 根据光谱响应结果, 再生实验中仅选取了输出共轭光功率最强的同向场作用情况进行分析, 结果如图 5 所示. 实验中泵浦注入功率固定在 0 dBm, 信号功率由可调衰减器 (VOA1) 在 -5—5 dBm 之间调整, 以寻找最佳工作点. 图 5(a), (b) 给出了共轭信号的幅度扰动与相位扰动随注入信号功率的变化关系. 由实验测试结果可知, 最佳信号功率点为 -2 dBm, 即 $\text{PSR} = 2 \text{ dB}$ 时, 该再生器实现最佳的幅度噪声抑制特性. 从幅度再生的角度来看, 该再生器获得的误差向量幅度增益 ($\Delta \text{EVM}|_{\text{Amp}}$) 达到 1.74 dB. 在图 5(a) 中还给出最佳再生点处获得的输入与输出信号星座图结果. 由于存在幅度压缩特性, 输出共

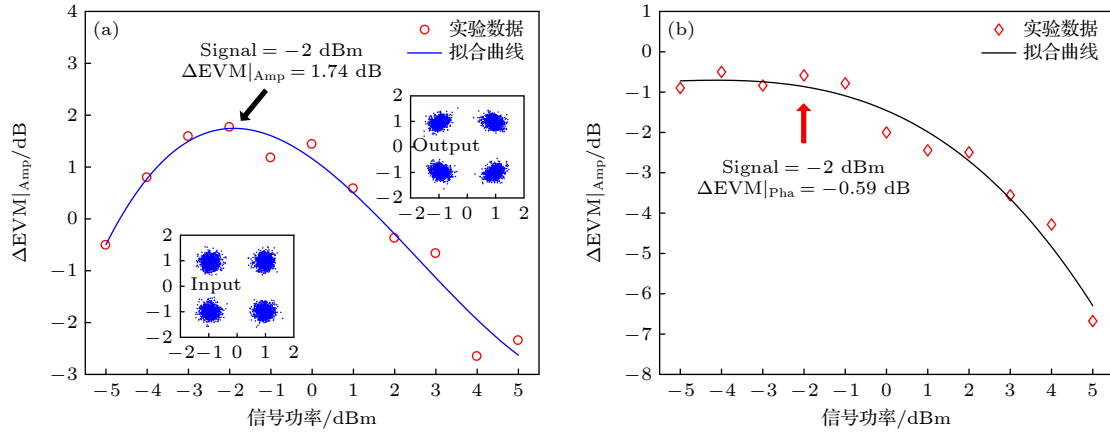


图 5 (a) 共轭信号的幅度再生性能; (b) 共轭信号的相位噪声特性

Fig. 5. (a) Amplitude regeneration performance; (b) characteristics of the phase noise obtained by the conjugated signals.

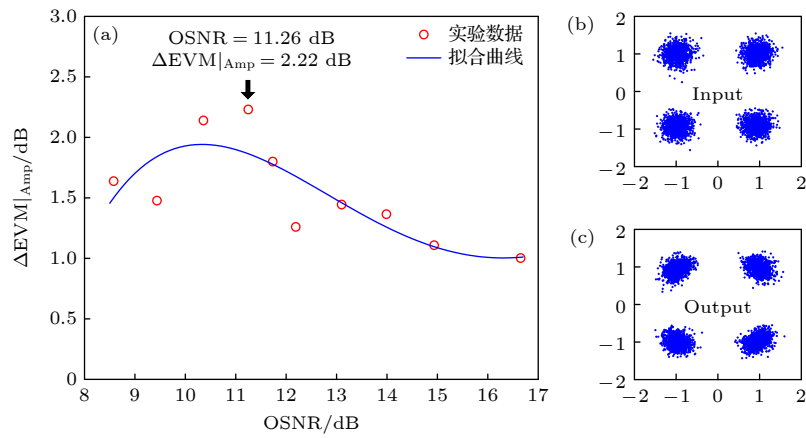


图 6 (a) 信号质量改善与输入信号 OSNR 的依赖关系; (b) 最佳再生点处输入信号星座图 ($\text{OSNR}_{\text{in}}=11.26$ dB); (c) 最佳再生点处共轭信号星座图

Fig. 6. (a) The relationship between the signal-quality improvement and the OSNR of input signals; constellation diagrams of (b) the input signal and (c) the regenerated conjugated signal for the case of the input $\text{OSNR}=11.26$ dB.

轭信号的星座图从幅度角度上存在明显的挤压效果, 即实现了信号的全光幅度再生. 图 5(b) 给出了上述功率变化范围内, 共轭信号的相位扰动情况: 1) 在最佳功率点位置处, 相位域上的误差向量幅度 ($\Delta\text{EVM}|_{\text{pha}}$) 仅劣化 0.6 dB, 达到了相位保持的工作特性; 2) 在 -5 — 1 dBm 功率范围内均保持了相同的相位输出水平, 表现出较大的功率容忍范围. 因此, 根据上述实验测量结果可验证双向正交泵浦 SOA 结构中实现了具有相位保持性的幅度再生过程.

为进一步确认该再生器工作性能, 实验测量了不同信号质量下的幅度噪声压缩结果, 如图 6 所示. 通过调节 EDFA 工作参数, 改变输入的 QPSK 信号光信噪比 (OSNR), 以验证再生器对通信系统中放大器级联情况下的自发辐射 (ASE) 噪声抑制

效果. 实验测量了 OSNR 在 8 dB 到 17 dB 情况下全光再生结果. 分析实验结果可知: 1) 该再生器具有较宽的噪声信号处理能力, 在整个测试范围内均得到明显的幅度噪声压缩效果; 2) 当输入信号的 $\text{OSNR} = 11.26$ dB 时, 再生器获得最大的幅度噪声压缩, $\Delta\text{EVM}|_{\text{Amp}}$ 达到 2.2 dB. 图 6(b), (c) 给出了最佳再生点处获得输入和输出信号星座图, 印证了相位保持幅度再生作用过程.

4 分析与讨论

在构建的数值仿真平台上, 进一步开展多进制数字相位调制 (MPSK) 信号的相位保持幅度再生仿真研究. 当 $M = 4$ 时, 即输入 QPSK 光信号, 分析不同 OSNR 情况下的再生结果如图 7 中红线所示.

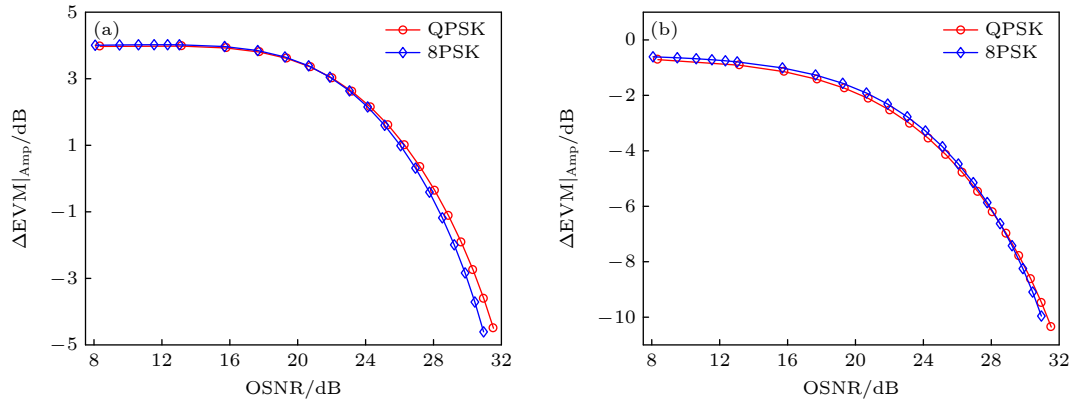


图 7 QPSK 和 8 PSK 信号的仿真结果 (a) 幅度再生性能与输入信号质量的依赖关系; (b) 相位噪声特性与输入信号质量的依赖关系

Fig. 7. Simulation results of QPSK and 8 PSK signal: (a) The dependency of the amplitude regeneration performance and (b) phase noise characteristics on the OSNR of the input signal.

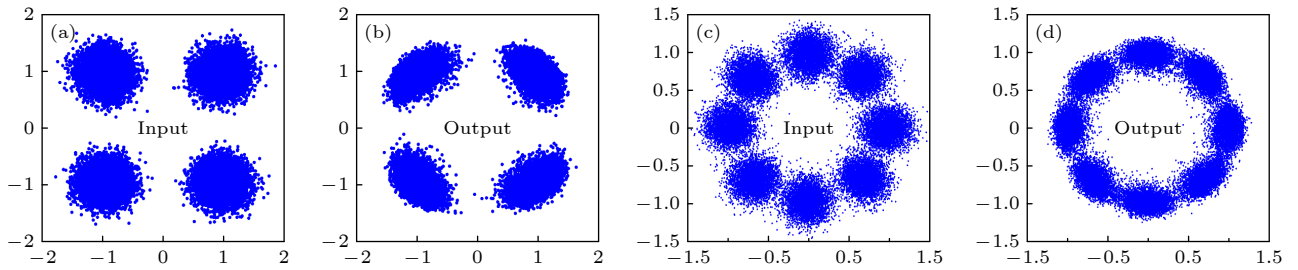


图 8 星座图结果 (a) 输入 QPSK 信号; (b) 再生 QPSK 信号; (c) 输入 8 PSK 信号; (d) 再生 8 PSK 信号

Fig. 8. Constellation diagram: (a) Input QPSK signal; (b) regenerated QPSK signal; (c) input 8 PSK signal; (d) regenerated 8 PSK signal.

当输入信号质量较差时, 双向正交 SOA 再生器通过幅度噪声压缩特性, 提升信号质量; 伴随着输入信号质量的逐渐提升, 该压缩效果引起的信号质量改善逐渐减弱, 因此再生信号质量变差. 从整体仿真结果来看, 本论文提出的再生器可以在 $\text{OSNR} < 26$ dB 以内的信号提供幅度再生效果, 表现出较强的劣化信号处理能力. 图 7(b) 给出了再生过程中, 信号相位的输出情况. 在输入信号质量较差的工作区间以内, 可以保持再生后信号的相位特性, 达到了相位保持的设计目的. 尽管仿真分析得到的最佳幅度噪声抑制结果较实验测量数值高 1 dB 左右, 但其幅度再生与输入信号的依赖关系和实验测量趋势基本一致, 其最佳幅度噪声抑制工作点均在 $\text{OSNR} = 12$ dB 左右, 这在一定程度上表明了本仿真分析系统的正确性.

在此基础上, 开展了 8 PSK 信号的幅度再生仿真分析. 在该仿真计算过程中, 输入信号光功率与泵浦功率值均与 QPSK 信号情况一致, 计算结果如图 7 中蓝线所示. 8 PSK 信号的幅度再生效果

以及相位保持特性与 QPSK 信号结果基本相同, 这表明本再生器可在不改变工作参数情况下, 支撑高阶 MPSK 信号的全光处理, 满足相干通信网络中多种类型信号的再生需求. 图 8 分别给了幅度噪声抑制最佳情况下, QPSK 信号和 8 PSK 信号再生前后的星座图对比, 进一步印证了双向正交 SOA 再生器的相位保持幅度再生特性.

5 结 论

本论文提出了双向正交泵浦 SOA 全光再生器结构, 该结构支持多重 FWM 作用过程, 不仅在输出端口可以得到共轭光产物, 也可在输入端口获得非线性混频结果. 实验研究了在同向场作用下得到的共轭信号质量, 分析其幅度噪声压缩能力随注入光功率、OSNR 参数的依赖关系, 获得最高 2.2 dB 的幅度再生结果. 通过构建系统仿真平台, 印证了多重 FWM 作用过程, 并进一步开展了 MPSK 信号的再生分析. 研究表明 8 PSK 信号可以使用与

QPSK 再生过程相同的工作参数, 达到最佳相位保持幅度再生效果, 表明本论文提出的全光再生器具有支持高阶调制信号的工作能力.

参考文献

- [1] Phillips I D, Tan M, Stephens M F C, McCarthy M E, Giacomidis E, Sygletos S, Rosa P, Fabbri S, Le S T, Kanesan T, Turitsyn S K, Doran N J, Harper P, Ellis A D 2014 *Proceedings of the Optical Fiber Communication (OFC) Conference* San Francisco, CA, USA, 9–13 March, 2014 pM3C.1
- [2] Al-Khateeb M, Tan M, Zhang T, and Ellis A D 2019 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **31** 877
- [3] Modiano E, Lin P J 2001 *IEEE Commun. Mag.* **39** 124
- [4] Rochette M, Fu, L, Ta'eed V, Moss D J, Eggleton B J 2006 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **12** 736
- [5] Chen X, Huo L, Lou C Y, Wang Q, Yu We K, Jiang X Y, Zhao Z X, Zhang E Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 054208 (in Chinese) [陈新, 霍力, 娄采云, 王强, 余文科, 姜向宇, 赵之玺, 章恩耀 2016 物理学报 **65** 054208]
- [6] Wen F, Wu B J, Zhou X Y, Yuan H, Qiu K. 2014 *Opt. Fiber Technol.* **20** 274
- [7] Slavík R, Parmigiani F, Kakande J, et al. 2010 *Nat. Photonics* **4** 690
- [8] Roethlingshoefer T, Richter T, Schubert C, Onishchukov G, Schmauss B, Leuchs G 2014 *Opt. Express* **22** 27077
- [9] Wen F, Wu B J, Qiu K, Sygletos S 2019 *Opt. Express* **27** 19940
- [10] Wang Y H, Wu B J, Guo B, Wen F, Qiu K 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 074202 (in Chinese) [王瑜浩, 武保剑, 郭飏, 文峰, 邱昆 2020 物理学报 **69** 074202]
- [11] Connolly M J, Krzczanowicz L, Morel P, Sharaiha A, Lelarge F, Brenot R, Joshi S, Barbet S 2016 *Front. Optoelectron.* **9** 341
- [12] Shao L, Sun F, Wen F, Yang Y, Yang F, Wu B J, Ling Y, Qiu K 2021 *Proceedings of the Signal Processing in Photonic Communications* Washington, DC United States, 26–29 July, 2021 pSpF2E.4
- [13] Sobhanan A, Venkitesh D 2018 *Opt. Express* **26** 22761
- [14] Sun F, Wen F, Wu B, Ling Y, Qiu K 2022 *Photonics* **9** 164
- [15] Deng L, Hagley E W, Wen J, Trippenbach M, Band Y, Julienne P S, Simsarian J E, Helmerson K, Rolston S L, Phillips W D 1999 *Nature* **398** 218
- [16] McKinstrie C J, Harvey J D, Radic S, Raymer M G 2005 *Opt. Express* **13** 9131
- [17] Li Q, Davanço M, Srinivasan K 2016 *Nat. Photonics* **10** 406
- [18] Li K, Sun H, Foster A C 2017 *Opt. Lett.* **42** 1488
- [19] Lacava C, Ettabib M A, Bucio T D, Sharp G, Khokhar A Z, Jung Y, Sorel M, Gardes F, Richardson D J, Petropoulos P, Parmigiani F 2019 *J. Lightwave Technol.* **37** 1680
- [20] Kyo I, Takaaki M, Tadashi S 1987 *Appl. Phys. Lett.* **51** 1051
- [21] Govind P A 1988 *J. Opt. Soc. Am. B-Opt. Phys.* **5** 147
- [22] Basil W H, Thomas L P 1973 *J. Appl. Phys.* **44** 4113

All-optical phase-preserving amplitude-regeneration technology based on bidirectional orthogonal-pumped semiconductor optical amplifier configuration^{*}

Sun Fan¹⁾ Wen Feng^{1)†} Wu Bao-Jian¹⁾ Tan Ming-Ming²⁾

Ling Yun¹⁾ Qiu Kun¹⁾

1) (*Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communication, Ministry of Education, School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*)

2) (*Aston Institute of Photonics Technologies, Aston University, Birmingham B4 7ET, UK*)

(Received 15 April 2022; revised manuscript received 29 June 2022)

Abstract

The phase-preserving amplitude regeneration scheme based on the bidirectional orthogonal-pumped semiconductor optical amplifier (SOA) is proposed in this work. Experimental investigation into the multiple four-wave mixing (FWM) process from the pump, the signal and their corresponding reflective fields is carried out in detail. The regeneration performance obtained from the product between co-propagating fields is also discussed, including its dependence on the signal launch power and the signal quality, to quantify the amplitude regeneration and the phase preserving behaviors. The amplitude distortion is suppressed by 2.2 dB experimentally, confirming the regeneration capability of the proposed scheme. Moreover, the regeneration performance is further investigated for multiple phase shift keying (MPSK) signals through the simulation. According to the numerical results, the operational parameters of the regenerator are the same for advanced modulation formats, proving the robust operation of the proposed bidirectional orthogonal-pumped SOA configuration.

Keywords: optical phase conjugation, semiconductor optical amplifier, four-wave mixing, all-optical regeneration

PACS: 42.65.-k, 42.65.Hw, 42.65.Ky

DOI: 10.7498/aps.71.20220703

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61975027, 61671108) and the Sichuan Science and Technology Program, China (Grant No. 2021YFG0143).

[†] Corresponding author. E-mail: fengwen@uestc.edu.cn

基于双向正交泵浦半导体光放大器结构的全光相位保持幅度再生技术

孙凡 文峰 武保剑 Tan Ming-Ming 凌云 邱昆

All-optical phase-preserving amplitude-regeneration technology based on bidirectional orthogonal-pumped semiconductor optical amplifier configuration

Sun Fan Wen Feng Wu Bao-Jian Tan Ming-Ming Ling Yun Qiu Kun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 204204 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220703

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四波混频光相位运算器原理及其噪声性能研究

Principle and noise performance of optical phase arithmetic devices using four wave mixing

物理学报. 2018, 67(9): 094208 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172638>

基于四波混频过程的纠缠光放大

Amplification of entangled beam based on four-wave mixing process

物理学报. 2022, 71(5): 050301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211324>

基于四波混频过程产生介于锥形探针光和锥形共轭光之间的多模量子关联

Experimental generation of multimode quantum correlations between a conical probe and a conical conjugate based on a four-wave mixing process

物理学报. 2022, 71(16): 160306 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220081>

基于非线性光纤环形镜的少模脉冲幅度调制再生器

Research on few-mode PAM regenerator based on nonlinear optical fiber loop mirror

物理学报. 2020, 69(7): 074202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191858>

空频复用光纤中四波混频过程的解析分析方法

Analytical method for four wave mixing in space-frequency multiplexing optical fibers

物理学报. 2019, 68(11): 114207 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182129>

基于级联四波混频过程的量子导引

Quantum steering based on cascaded four-wave mixing processes

物理学报. 2021, 70(16): 160301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201981>